doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.01.008

太阳黑子本影振荡的多波段观测*

李 东†

(中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

摘要　基于多波段的观测数据, 研究了黑子本影振荡在太阳大气不同高度或温度的振荡特征. 目标黑子发生在2017年9月15日, 位于活动区12680. 多波段的观测数据包括AIA (Atmospheric Imaging Assembly)的极紫外成像及IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph)的紫外光谱和成像. 在太阳黑子的本影位置, AIA 1700 Å光变曲线的振荡周期约为(4.2±0.8) min, 而AIA 1600 Å、171 Å和193 Å光变曲线的振荡周期约为(2.8±0.3) min. IRIS的Mg II h和k谱线及远紫外成像(2796 Å)都表现为(3.1±0.5) min的准周期振荡, 而谱线Si IV 1393.76 Å的振荡周期约为(2.9±0.4) min. 观测结果说明黑子本影的振荡周期随着太阳大气高度的升高而逐渐减小. 较短的周期可认为是3 min振荡, 很可能与黑子本影上方的慢磁声波有关, 它起源于温度极小区并向上传播到日冕. 较长的周期可解释为光球的5 min振荡, 与太阳的P模振荡有关.

关键词　太阳黑子, 太阳: 大气, 太阳: 振荡, 磁流体力学, 波动

中图分类号: P182;　**文献标识码**: A

1　简介

太阳黑子是太阳表面最显著的特征之一, 是太阳表面磁场比较强的区域, 所以它比周围的大气更暗、温度更低[1]. 观测上, 黑子一般是由中心比较暗的核心和周围比较弥散的暗晕组成, 它们分别被命名为黑子的本影和半影. 黑子的本影通常被一些亮结构分成更小的几部分, 这些亮结构类似于架在本影之间的桥梁, 因此被称作亮桥[2–3]. 虽然太阳黑子被约束在很强的磁场内, 然而高分辨率的观测表明它是高度动态的. 在黑子及其上方大气中发现并报道了各种类型的振荡和波动现象: 由本影中心向本影-半影边界传播的本影行波, 由本影-半影边界向半影-光球边界传播的半影行波, 二者密切相关但传播的速度明显不同; 在亮桥上也发现了准周期振荡的现象, 被称为亮桥振荡; 此外, 在黑子上方的太阳大气中还发现了向上传播的振荡现象. 这些与黑子有关的振荡或波动现象一般认为是太阳大气中的MHD (Magnetohydrodynamics)波[4–6]. 基于高空间和高光谱分辨率的观测数据, 在太阳黑子中还发现了许多精细尺度的结构: Ji等[7]在黑子本影的内部发现了一些孤立的尺度较小的增亮, 称为本影点; Sobotka等[8]则进一步在黑子半影内部观测到了一些明亮且细长的特征现象, 称为半影谷穗(Penumbral Grains); Buehler等[9]发现了半影微喷流, 它们主要集中在黑子上方的色球层; Tian等[10]在亮桥附近发现了一系列小尺度的喷流结构, 并证实它们是由磁场重联驱动的. 所有观测结果说明太阳黑子中存在大量精细结构, 有很高的动力学特性.

准周期振荡是太阳黑子中普遍存在的现象, 在太阳大气的不同高度都发现了黑子振荡的迹象. 太

2022-11-24收到原稿, 2022-12-14收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11973092)、江苏省自然科学基金项目(BK20211402)资助

†lidong@pmo.ac.cn

阳黑子的振荡经常与MHD波联系在一起, 是太阳物理的一个重要研究方向[11]. 观测研究发现在太阳大气的光球层高度, 黑子振荡的周期大约为5 min, 一般认为它们与光球层的P模振荡(波)有关[4]. 研究人员在太阳的高层大气, 如黑子上方的色球层、过渡区甚至是日冕层都发现了周期约为3 min的振荡现象, 并认为它们是黑子振荡的共振模式[12]. 特别是黑子本影上方的3 min振荡可以同时在光球上层、色球层和过渡区以及日冕层中被探测到, 说明黑子本影的3 min振荡是传播的MHD波, 它可以从太阳的低层大气一直向上传播到高层大气[2, 13]. 在太阳大气的色球层高度, 尤其是黑子上方, 存在一些周期性的增亮现象, 称为本影闪烁, 它经常伴随着周期为3 min的垂直的上下运动[14]. 因此, 本影闪烁很可能与激波引起的垂直向上传播的MHD波有关. 在太阳大气的日冕层高度也发现了周期约为3 min的振荡(位于黑子上方): 在极紫外成像观测中, 它通常出现在扇形磁环的足点附近[15]; 在射电观测中, 它一般在日冕高度的本影上方被观测到[16]. 另一方面, 在太阳黑子附近还发现了周期为3–5 min的行波, 它们与黑子本影振荡的周期非常接近[17–18]. 总之, 太阳黑子的振荡在其本质上可以认为是横跨黑子的MHD波[19], 或者通常解释为传播的慢磁声波[12].

使用红外和紫外的光谱观测数据, 我们曾报道了黑子本影位置的多普勒速度振荡, 研究主要集中在光球层和色球层[20]. 这里结合极紫外成像和紫外光谱的观测数据, 我们对黑子本影振荡进行了更深入的分析研究, 主要研究黑子本影振荡的周期在太阳大气不同高度的变化, 从光球层和温度极小区经色球层和过渡区直到日冕层. 文章组织结构如下: 第2节介绍观测所用的仪器和数据处理, 第3节描述主要分析结果, 最后第4节给出小结并进行简要的讨论.

2 观测仪器和数据处理

文章分析了发生在2017年9月15日的一个太阳黑子, 它位于活动区12680, 靠近日面中心(N08E01: 北纬8°, 东经1°). 这个黑子, 尤其是它的本影区被两个太阳望远镜在多个波段同时观测到: 包括SDO (Solar Dynamics Observatory)上搭载的AIA (Atmospheric Imaging Assembly)[21]和IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph)[22]上的SG (Spectrograph)和SJI (Slit-Jaw Imager). 表1列出了文中用到的望远镜的详细参数. 图1则描述了目标黑子在大约18:00 UT的多波段成像观测结果, 所展示的图像都有相同的视场大小, 约为$66'' \times 80''$.

表 1 文中所用太阳望远镜的详细参数表

Table 1 The details of observational telescopes in this paper

Instrument	Wavelength/Å	Cadence/s	Spatial/(arcsec · pixel^{-1})	Spectral/(mÅ · pixel^{-1})
SDO	AIA 4500	3600	0.6	–
	AIA 1700	24	0.6	–
	AIA 1600	24	0.6	–
	AIA 171	12	0.6	–
	AIA 193	12	0.6	–
IRIS	Mg II h 2803.53	19	0.166	25.46
	Mg II k 2796.35	19	0.166	25.46
	Si IV 1393.76	19	0.166	25.44
	SJI 2796	37	0.166	–
	SJI 2832	223	0.166	–

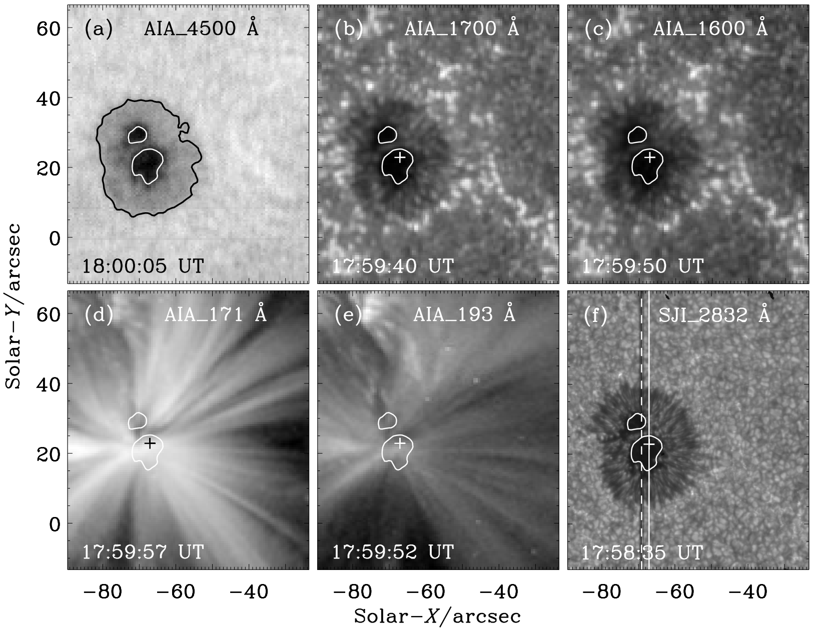

图 1 2017年9月15日太阳黑子的多波段照片. 黑色和白色轮廓线分别表示半影-光球和本影-半影边界, 数据来自AIA 4500 Å的可见光辐射. 两条竖线代表IRIS光谱狭缝的位置, 加号标识了文中研究的本影位置.

Fig. 1 Multi-wavelength snapshots of the sunspot on 2017 September 15. The black and white contour lines are derived from the visible continuum radiation at AIA 4500 Å, representing the penumbral-photospheric and umbral-penumbral boundaries, respectively. Two vertical lines indicate IRIS slits, and the plus marks the studied location at the sunspot umbra.

图1 (a)–(e)展示的是SDO/AIA拍摄到的黑子所在活动区的图像, 观测波段分别是4500 Å、1700 Å、1600 Å、171 Å和193 Å. 基于AIA的标准程序(如'aia_prep.pro'), 这些图像都进行了预处理, 使得它们有相同的空间分辨率, 见表1. 图1 (a)–(c)显示目标黑子位于太阳日面中心附近, 它由两个本影区和一个半影区组成, 黑子的本影区域被亮桥分成两部分, 图中白色和黑色的轮廓线分别表示本影和半影的分界线以及半影和光球的分界线. 图1 (d)–(e)显示有多组明亮的扇形冕环结构存在, 它们的足点基本都位于黑子的本影区域. 这里需要说明的是AIA 4500 Å和1700 Å的图像主要是来自光球和温度极小区的连续谱辐射, 它们的特征温度约为5×10^3 K. AIA 1600 Å的图像则普遍来自过渡区谱线C IV的辐射, 或来自光球上层的连续谱辐射, 对应的特征温度分别约为10^5 K或6×10^3 K. 在没有耀斑辐射的情况下, AIA 171 Å和193 Å的辐射主要来自日冕高次电离的铁离子, 如Fe IX和Fe XII等, 它们的典型温度分别约为6×10^5 K (AIA 171 Å)和1.6×10^6 K (AIA 193 Å)[21]. 因此, SDO/AIA在这几个波段的观测反映了太阳大气在不同高度的辐射特征, 比如光球层或温度极小区(AIA 1700 Å和4500 Å)、过渡区(AIA 1600 Å)和日冕层(AIA 171 Å和193 Å).

IRIS的紫外光谱和成像也同时观测到了目标黑子. 图1 (f)展示了IRIS在近紫外的图像, 它是SJI在中心波长2832 Å处的成像结果, 这里可以清楚地看到太阳黑子的本影和半影结构. 两条竖线标出了IRIS光谱狭缝的位置, 它们沿着太阳的南北方向, 其中实线标的位置是文章研究的目标. 在本次观测中, SG采用的是二步扫描的模式, 即从16:40:15 UT到18:01:59 UT这段时间内, IRIS的狭缝不断重复(约264次)扫描经过黑子的本影区域, 两次相邻扫描的间隔时间大约是19 s. 这里需要说明的是SJI

2832 Å的图像主要包括来自Mg II线翼的辐射, 它的特征温度约为(5–8)×10^3 K, 反映了光球上层到色球低层之间的辐射信息. SJI 2796 Å图像的辐射则主要来自色球谱线Mg II k的贡献, 对应的形成温度约为10^4 K. Mg II h和k双线均来自色球辐射, 形成温度约为10^4 K, 而Si IV谱线则主要来自过渡区的辐射, 形成温度约为6.3×10^4 K[22]. 为了研究黑子的本影振荡, 文章使用了SJI 2796 Å的成像数据以及Mg II h 2803.53 Å、Mg II k 2796.35 Å和Si IV 1393.76 Å的谱线数据, 它们反映的是太阳色球层或过渡区的辐射特征, 与SDO/AIA的观测高度形成互补. 更重要的是它们的时间分辨率足够用来探测黑子本影振荡的周期, 而SJI 2832 Å的时间分辨率则不足以用来研究黑子本影振荡的周期, 详见表1. 对于色球谱线Mg II k 2796.35 Å和Mg II h 2803.53 Å, 文章使用矩分析的方法来得到它们的谱线强度和多普勒速度, 这和之前的研究方法是一致的[20, 23]. 相反, 对于过渡区谱线Si IV 1393.76 Å, 由于它在黑子本影上方的辐射比较弱, 文章仅仅使用了它的积分强度, 积分范围是±20 km·s^{-1}.

3 结果

图2展示了IRIS在紫外波段的谱线随时间的演化, 所选的位置位于太阳黑子本影的上方, 如图1中加号所示. 之所以选择这个位置是因为在以前的工作中研究了此处的黑子振荡, 重点关注的是红外谱线(CO)多普勒速度的振荡[20], 因此只研究了黑子振荡在光球上层到色球层的变化. 这里, 通过进一步分析紫外光谱和极紫外成像, 我们将黑子本影振荡的研究范围扩展到过渡区和日冕层. 图2 (a)和(b)画的是远紫外谱线Mg II k和Mg II h随时间的演化过程, 它们都呈现出一系列增亮的带状结构, 表现出很好的周期特性. 这些亮带是由一系列非常亮的几乎竖直的片状结构(黑色箭头)和比较暗的斜片(白色箭头)组成. 图2 (c)则给出了近紫外谱线Si IV随时间的演化过程, 它也是由一系列增亮的带状结构组成, 周期性也很好. 然而这些亮带仅仅是由一组组重复增亮的斜片组成, 并没有像Mg II线那样出现非常亮的直片状结构和比较暗的斜片结构. 对于色球谱线Mg II k和Mg II h, 谱线强度的增强发生在最大蓝移速度之前; 而对于Si IV这条过渡区谱线, 其谱线强度的最大值要稍晚于最大蓝移速度. 造成这种差别的原因可能是色球谱线Mg II k和Mg II h的光学厚度比过渡区谱线Si IV的更大. 色球谱线和过渡区谱线的时间延迟可以看做是激波的光谱特征[24]. 此外, Si IV线的强度要远小于Mg II线的强度, 接近于背景强度, 因此很难用高斯拟合或矩分析的方法得到它的谱线强度和多普勒速度, 文章仅使用了它在±20 km·s^{-1}范围内的积分强度.

为了详细研究黑子的本影振荡, 文章选取了黑子本影的一个位置提取它在太阳大气不同高度的光变曲线, 如图3所示. 图3 (a)和(b)画的是SDO/AIA在紫外和极紫外波段的光变曲线, 它们已经进行了归一化处理, 即除以它们各自的最大值($f_{\rm max}$). SDO/AIA的光变曲线都表现为一些重复出现的有规律的小峰, 可以看做是准周期振荡的信号. 比较有趣的是AIA 1700 Å波段的光变曲线, 它的小峰数量要明显少于其它三个波段(AIA 1600 Å、AIA 171 Å和AIA 193 Å)的小峰数目, 说明黑子本影在AIA 1700 Å波段的准周期要稍长. 另一方面, 这些波段的AIA光变曲线都表现为强背景上的小幅度振荡, 尤其是AIA 171 Å和AIA 193 Å这两个日冕高度的波段, 它们归一化后的强度变化范围只有约0.9–1.0, 而AIA 1700 Å和AIA 1600 Å这两个波段在归一化后的强度变化范围也只有0.8–1.0. 图3 (c)展示的是归一化的IRIS光变曲线, 分别来自色球谱线Mg II h, 过渡区谱线Si IV和色球图像SJI 2796 Å, 选取是同一位置的黑子本影. 与SDO/AIA的光变曲线类似, IRIS的光变曲线也是由一系列重复出现的小峰组成, 可以看做是准周期振荡的标志. 更重要的是IRIS的光变曲线显示出大幅度的振荡, 尤其是色球谱线Mg II h, 它归一化后的强度变化范围几乎为0.0–1.0. 图3 (d)给出了色球谱线Mg II h和Mg II k的多普勒速度曲线, 二者都显示出明显的准周期振荡信号. 同时两条色球谱线的多普勒速度最高可以达到9 km·s^{-1}, 这与以前的观测结果是一致的[20, 24].

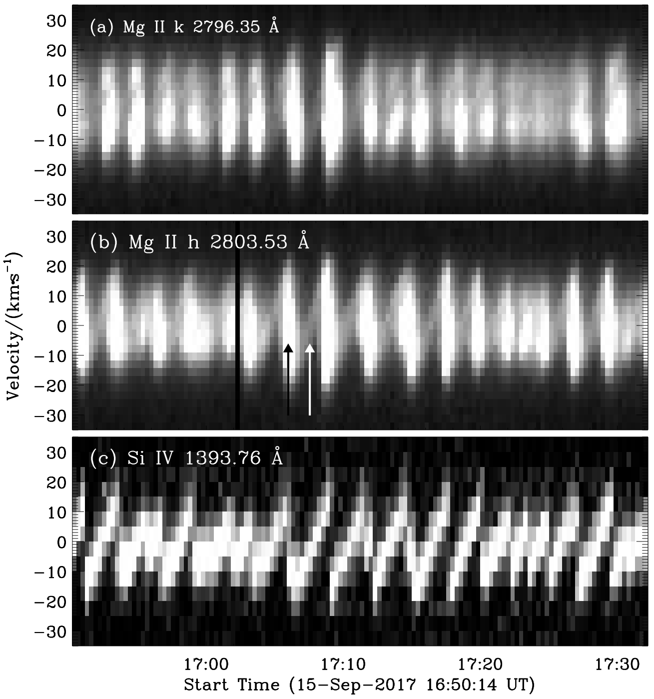

图 2 太阳黑子本影附近(图1中的加号标记)的IRIS谱线随时间的演化: (a) Mg II k, (b) Mg II h, (c) Si IV. 文中使用的参考线心已在各图中标出.

Fig. 2 Temporal evolutions of IRIS spectral lines in Mg II k (a), Mg II h (b), and Si IV (c) at the sunspot umbra (the plus in Figure 1), respectively. The reference wavelength used here is labeled in each panel.

为了突出显示黑子的本影振荡, 文章进一步通过减背景强度的方法提取了去趋势的光变曲线. 背景强度(或长周期趋势$f_{\rm trend}$)是通过平滑原始光变曲线得到的, 文中用到的是6 min的平滑窗口, 这主要是为了增强周期为3 min或5 min的振荡信号, 同时抑制长周期趋势的信号. 图4展示的是各个波段去趋势的光变曲线, 为了更好地显示振荡信号的强弱, 这里展示的是相对强度, 即

$$\partial f = \frac{f - f_{\rm trend}}{f_{\rm max}} \times 100\%\,.$$

图4 (a)–(c)给出了SDO/AIA和IRIS观测到的去趋势的光变曲线, 包括来自图像的AIA 1700 Å、AIA 1600 Å、AIA 171 Å、AIA 193 Å和SJI 2796 Å以及来自谱线的Mg II h和Si IV. 与原始曲线类似, 这些去趋势的光变曲线都显示出非常明显的准周期振荡特征: 一系列重复的规律脉冲峰. 相对于背景强度, AIA波段的强度振荡表现为很小尺度的振幅. 在AIA 1700 Å和1600 Å这两个波段, 振幅约等于5%, 而在AIA 171 Å和193 Å这两个波段, 振幅仅有约2%–3%. 这些数据说明SDO/AIA的光变曲线是由小振幅振荡和强背景辐射叠加在一起的, 所以在减去背景趋势之前, 这些小振幅的振荡很难被识别出来. 此外, AIA 1600 Å波段脉冲峰的持续时间短于AIA 1700 Å波段, 说明AIA 1600 Å波段的振荡周期更短, 这与之前原始曲线的观测结果是一致的. 另一方面, AIA 1600 Å和1700 Å这两个波段的脉冲峰存在明显的时间延迟, 说明它们之间存在相位差. 在日冕层高度的两个波段AIA 171 Å和193 Å则不存在明显的相位差, 它们的脉冲峰几乎是同时的. IRIS观测到的谱线强度(Mg II h和Si IV)的振幅比较大, 在20%–40%之间. 因此, 它们的振荡比较容易辨别. 同样的, 在色球谱线Mg II h和成像SJI 2796 Å之间也没有发现明显的相位差. 图4 (d)展示了去趋势的多普勒速度曲线, 包括Mg II h和Mg II

k两条色球谱线. 它们都显示出大振幅的振荡, 某些地方的振幅高达60%. 因此, 多普勒速度是研究黑子振荡比较好的手段.

为了更进一步看清楚黑子本影振荡的准周期, 文章对图4所示的去趋势光变曲线进行了FFT (Fast Fourier Transform)分析. 图5展示了Lomb-Scargle周期图[25], 横坐标表示周期分布, 纵坐标是归一化的傅里叶功率, 即除以它们的最大功率, 横线表示99.9%的置信度[26]. 这里, 傅里叶功率的峰值可以看做是振荡的周期, 而周期的误差则取为傅里叶功率谱在99%置信度的半宽[27]. 如此, 我们便得到了不同波长处的带误差的周期, 它们位于太阳大气的不同高度, 如表2所示. 综合图5和表2, 我们可以看到在AIA 1700 Å波段有一个较长的周期, 约为(4.2±0.8) min, 这也是我们所有观测波段中唯一一个超过4 min的周期, 如图5 (a)所示. 一个较短的周期(3.1±0.5) min同时在色球谱线Mg II k和Mg II h的强度和多普勒速度中被探测到, 它同时在SJI 2796 Å波段的成像中被观测到, 详见图5 (b)–(e). 图5 (f)表示在IRIS的过渡区谱线Si IV的强度上存在约为(2.9±0.4) min的准周期. 最后, 在SDO/AIA的紫外(AIA 1600 Å)和极紫外波段(AIA 171 Å和193 Å)都发现了相同的短周期, 大约为(2.8±0.3) min, 详见图5 (g)–(i). 这里需要说明的是所有波段的准周期测量都来自太阳黑子半影的同一个位置, 如图1中加号所示, 但是它们在太阳大气中的高度不同.

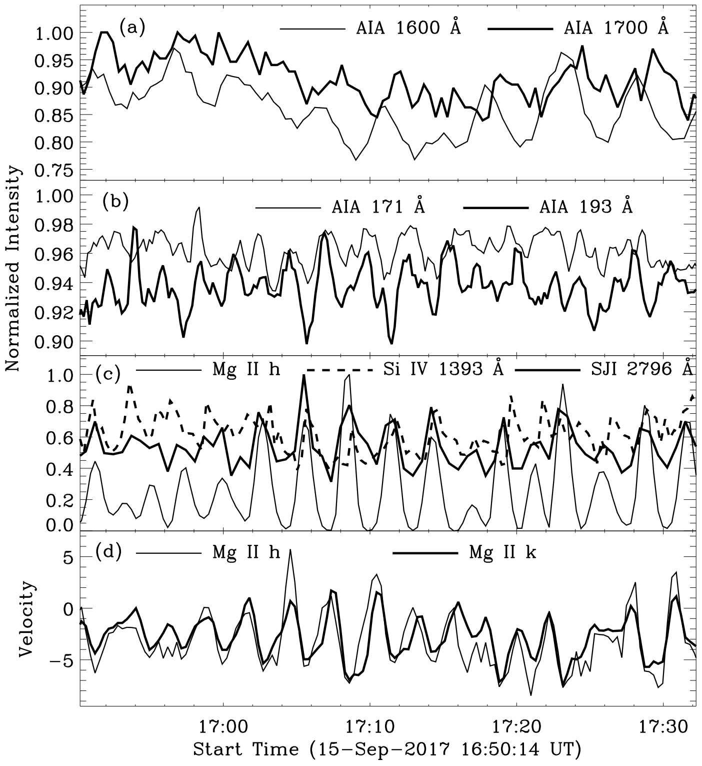

图 3 太阳黑子本影位置光变曲线的多波段观测: (a)和(b)是归一化的SDO/AIA光变曲线, (c)归一化的IRIS的光变曲线, (d)Mg II h和k线的多普勒速度随时间的演化.

Fig. 3 Multi-wavelength light curves at the same umbral position. (a) and (b): Normalized SDO/AIA light curves. (c): Normalized IRIS light curves. (d): Time series of Doppler velocity at Mg II h and k lines.

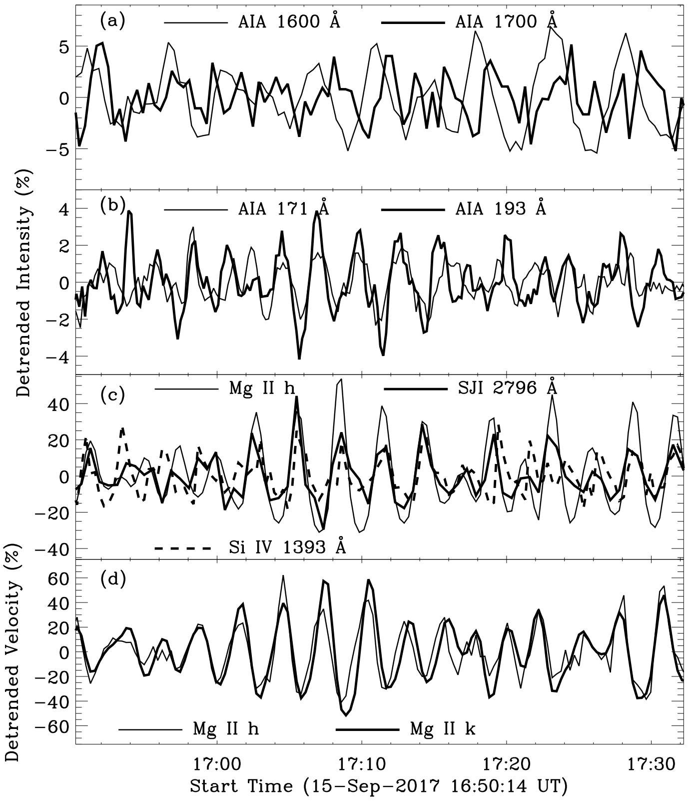

图 4 太阳黑子本影位置去趋势的光变曲线: (a)和(b)去趋势的SDO/AIA光变曲线, (c)去趋势的IRIS的光变曲线, (d)去趋势多普勒速度随时间的演化.

Fig. 4 Detrended light curves at the same umbral position. (a) and (b): Detrended SDO/AIA light curves. (c): Detrended IRIS light curves. (d): Detrended light curves of Doppler velocity at Mg II h and k lines.

表 2 太阳大气不同高度探测到的本影振荡周期

Table 2 Periods of umbral oscillations detected at multi-height solar atmosphere

Wavelength/Å	Parameter	Period/min	Temperature/K	Atmospheric height
AIA 1700	Intensity	4.2±0.8	$\sim5\times10^3$	Photosphere
Mg II k 2796.35	Doppler velocity	3.1±0.5	$\sim 10^4$	Chromosphere
Mg II h 2803.53	Doppler velocity	3.1±0.5	$\sim 10^4$	Chromosphere
Mg II h 2803.53	Intensity	3.1±0.5	$\sim 10^4$	Chromosphere
SJI 2796	Intensity	3.1±0.5	$\sim 10^4$	Chromosphere
Si IV 1393.76	Intensity	2.9±0.4	$\sim6.3\times10^4$	Transition region
AIA 1600	Intensity	2.8±0.3	10^5	Transition region
AIA 171	Intensity	2.8±0.3	$\sim6\times10^5$	Corona
AIA 193	Intensity	2.8±0.3	$\sim1.6\times10^6$	Corona

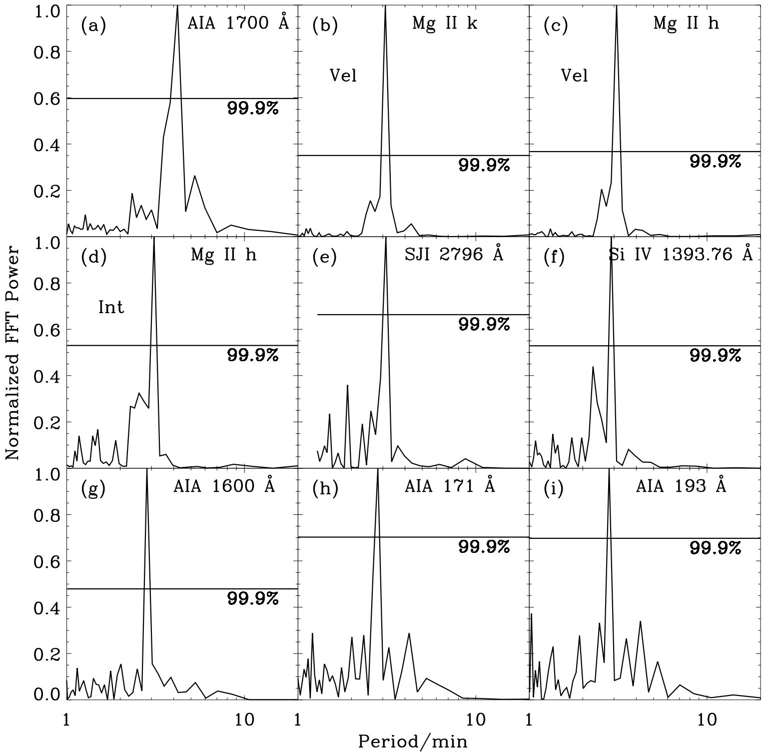

图 5　Lomb-Scargle周期图, 它们来自太阳黑子本影附近去趋势的光变曲线. 横线表示99.9%的置信度.

Fig. 5　Lomb-Scargle periodogram of the detrended light curves from the sunspot umbra. A horizontal line in each panel indicates the 99.9% confidence level.

从图3与图4中, 我们可以看到Mg II h线的多普勒速度和谱线强度到达峰值的时间不一致, 说明它们之间存在明显的相位差. 为了进一步研究它们的相位差, 图6展示了Mg II h线的多普勒速度和谱线强度相关性分析的结果, 即多普勒速度和谱线强度的相关系数随时间延迟的演化. 我们可以发现不管是原始曲线之间的相关系数(细线), 还是去趋势曲线之间的相关系数(粗线), 最大值都发生在同一位置, 约0.95 min, 如图中竖直的点线所示. 如果进一步考虑Mg II h线的振荡周期约为3.1 min (表2), Mg II h线的多普勒速度和谱线强度之间的相位差大约是110°. Yuan等[28]的MHD模拟结果显示, 如果给慢磁声波增加一个随机驱动, 那么在色球层高度的谱线多普勒速度和强度(或密度)之间存在明显的相位差, 且相位差表现得很复杂. 因此, 色球谱线Mg II h的多普勒速度和谱线强度之间的相位差说明黑子本影振荡很有可能是随机驱动的. 同时, 二者之间的相位差也暗示了黑子的3 min本影振荡是竖直向上传播的MHD波[11].

4　小结和讨论

基于空间卫星SDO和IRIS的多波段图像与光谱数据, 文章研究了黑子本影振荡在太阳大气不同高度的准周期特性. 这个目标黑子发生在2017年9月15日, 同时被IRIS和SDO/AIA观测到. 在太阳的低层大气如光球层, 黑子本影位置的AIA 1700 Å光变曲线表现为较长周期的振荡, 周期约为(4.2±0.8) min, 然而它的振幅只有背景强度的5%左右. 在太阳的中层大气, 如色球层和过渡区, 相同的黑子本影位置则发现了较短周期的振荡. 色球谱线Mg II h和Mg II k的多普勒速度与谱线强度的振荡周期约为(3.1±0.5) min, 相同的准周期也在SJI 2796 Å的光变曲线中被观测

到. 它们的振幅也比较大, 可以达到背景强度的20%以上, 尤其是多普勒速度可以高达60%. 过渡区谱线Si IV的积分强度则表现为更短周期的振荡, 周期大约为(2.9±0.4) min. 在太阳高层大气, 如过渡区上层和日冕层, 相同的黑子本影位置处发现了类似的短周期振荡. 在AIA 1600 Å、171 Å和193 Å这三个紫外或极紫外波段中同时发现了周期约为(2.8±0.3) min的振荡特征, 但是它们的振幅非常小, 只有背景强度的2%–5%. 使用红外的光谱数据如CO, 我们曾研究了目标黑子在同一本影位置的多普勒速度振荡[20]. 分析发现, 较弱的红外谱线CO 7-6 R67的多普勒速度有非常明显的5 min振荡, 而较强的红外谱线CO 3-2 R14的多普勒速度则同时出现了双周期的振荡, 周期分别为5 min和3 min. 这主要是由于红外谱线CO 7-6 R67主要形成于太阳大气的光球层, 而红外谱线CO 3-2 R14则形成于太阳大气的多个高度, 从光球上层经温度极小区直到低色球层[20, 29]. 这与本文的研究结果是一致的, 本文还进一步将黑子本影振荡的研究范围扩展到太阳大气的更高层, 如过渡区和日冕层. 文章中探测到的较长周期振荡非常接近于光球上黑子的5 min振荡, 因此它可以解释为太阳光球的P模波[4, 30]. 同时, 文章中探测到的较短周期振荡非常类似于黑子上方色球层到日冕层的3 min振荡, 所以它可能是由黑子本影上方3 min振荡的共振模式引起的[12, 24]. 观测结果说明在黑子上方, 本影振荡的准周期从太阳光球层、温度极小区、过渡区至日冕, 呈现出微弱减小的趋势. 结合我们以前使用红外(CO)谱线的观测结果, 可以发现5 min振荡只在光球层中存在, 不能向上传播; 而3 min振荡起源于温度极小区或色球低层, 可以向上传播, 经过整个色球层和过渡区直到日冕层. 这一结果同时说明黑子本影上方的3 min振荡是可以竖直向上传播的MHD波[13]. 因此, 黑子本影上方的3 min振荡可以解释为沿太阳外层大气向外传播的慢磁声波[3–4]. 我们的观测结果与P模振荡垂直向上传播时周期会受到截止频率影响的理论预期一致.

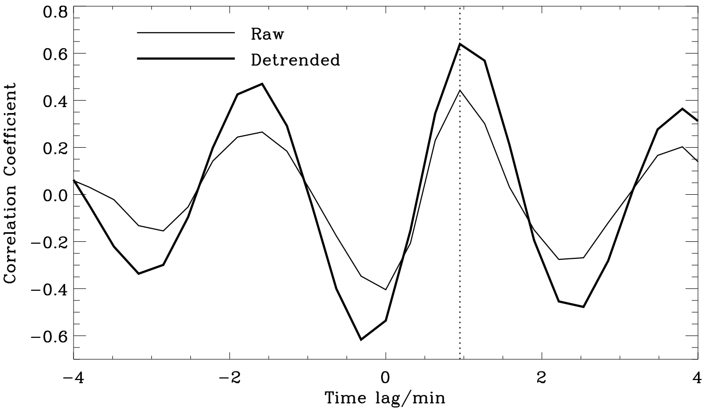

图 6 原始(细)和去趋势(粗)的多普勒速度和谱线强度的相关系数随时间延迟的变化. 竖直的点线标识了多普勒速度和谱线强度相关系数最大的位置.

Fig. 6 Correlation coefficients between Doppler velocities and line intensities of raw (thin line) and detrended (think line) light curves as a function of the time lag. The vertical dotted line marks the position of maximal correlation coefficient.

为了更清楚地展示黑子本影振荡在太阳大气不同高度的周期分布, 图7给出了太阳外层大气示意图. 这里PH、TM、CH和TR分别是光球(Photosphere)、温度极小区(Temperature minimum)、色球(Chromosphere)和过渡区(Transition region)的缩写. 该示意图基于经典分层模型[31], 展示了一个近似的平面平行分层结构. 白色和黑色的正弦函数曲线分别表示黑子本影上方的5 min振荡和3 min

振荡. 图右侧的横线与误差棒标记了不同波段观测到的周期尺度, 可以更加直观地对比它们在不同高度的变化. 根据黑子本影上方多波段观测发现的振荡周期(图5), 可以反演出观测所用的谱线和在太阳大气的成像高度, 详见图7和表2. 一般来说, AIA 1700 Å波段的成像包括光球层和温度极小区的辐射信息[21]. 然而在本次观测中, AIA 1700 Å在黑子本影处的强度只出现了长周期的振荡, 准周期约为(4.2±0.8) min. 这与我们以前的观测结果[20]类似, 形成于光球的红外谱线CO 7-6 R67在黑子本影处的振荡周期大约为5 min, 而跨越光球和温度极小区的红外谱线CO 3-2 R14在黑子本影处有两个振荡周期, 分别为5 min和3 min, 如图7中白色箭头所示. 因此, AIA 1700 Å波段在黑子本影位置的辐射主要来自光球层, 这与红外谱线CO 7-6 R67相似, 如图7所示. 两条远紫外谱线Mg II h和Mg II k的多普勒速度和谱线强度以及SJI 2796 Å波段的强度都有很强的本影振荡, 周期是相同的, 大约为(3.1±0.5) min, 说明它们的形成高度是相同的, 即它们的辐射主要来自色球层[22]. 对于近紫外谱线Si IV, 它在黑子本影位置的积分强度也有很强的振荡信号, 准周期比远紫外谱线(Mg II h和Mg II k)要小, 大约为(2.9±0.4) min, 说明它在太阳大气的位置要高于色球层, 也即形成于过渡区(图7), 与理论预期[22]相符. 理论上, AIA 1600 Å波段的成像是由光球层的连续谱辐射和过渡区谱线C IV的辐射混合组成的[21]. 最近的观测研究发现在太阳表面的光斑区, 光球连续谱的辐射在AIA 1600 Å波段中占据主导地位[32]. 同时, 图1 (b)和(c)显示AIA 1600 Å和AIA 1700 Å这两个波段在光斑区的形态结构几乎是一致的. 因此, 在太阳表面的光斑区, 光球连续谱的辐射对于AIA 1600 Å波段有着重要贡献, 是不可忽略的. 然而, 在太阳黑子的本影位置, 光球连续谱的辐射在AIA 1600 Å波段是否仍然占据主导地位依然是个谜. 在AIA 1600 Å波段的光变曲线中, 我们发现了周期约为(2.8±0.3) min的本影振荡, 但是没有发现如AIA 1700 Å波段里的长周期本影振荡. 使用AIA 1600 Å波段的数据, Su等[33]也在黑子的本影位置发现了周期约为2.7 min的本影振荡, 与我们的结果很接近. 由此, 黑子本影位置AIA 1600 Å波段的图像是以过渡区谱线C IV的辐射占主导的, 极有可能来自过渡区的上层. 此外, 在黑子本影的位置, AIA 171 Å和193 Å这两个波段表现为扇形冕环的足点, 它们的振荡周期约为(2.8±0.3) min, 这个结果与它们的辐射主要来自日冕等离子体是一致的, 如图7所示. 黑子本影振荡在太阳大气的不同高度具有不同的周期, 说明了太阳外层大气的分层结构, 而红外谱线的双周期[20]则暗示了太阳外层大气不是严格的等级分层结构[31].

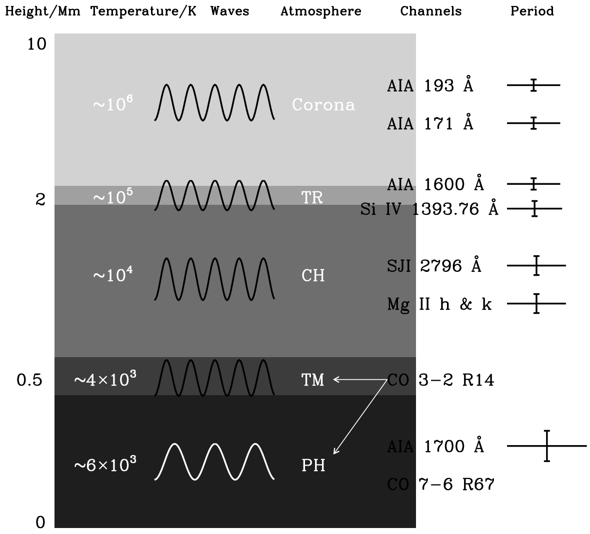

图 7 基于经典分层模型[31]的太阳外部大气示意图. 高度‘0’是指$\tau_{500} = 1$, 即太阳大气对于白光的光学深度为1的位置. 示意图的右侧列出了文中的多个观测波段, CO的数据来自文献[20]. 白色和黑色函数曲线分别表示准周期为5 min和3 min的黑子本影振荡. 横线与误差棒标记各观测波段的周期尺度.

Fig. 7 Sketch plot of outer solar atmosphere based on the classical layered model[31]. The height ‘0’ is at $\tau_{500} = 1$, namely, the optical depth of white light in the solar atmosphere is 1. The multiple channels used here are also listed in the right-hand side, and the data of CO is referred to Ref.[20]. White and black curves indicate umbral oscillations at periods of 5 minutes and 3 minutes, respectively. The horizontal lines and their error bars indicate the periods observed in multiple wavelengths.

最后, 我们在IRIS的谱线轮廓中发现了激波的光谱观测特征, 包括色球谱线Mg II h、Mg II k和过渡区谱线Si IV, 如图2所示. 它们的谱线首先表现出

快速的蓝翼方向的漂移, 随后谱线强度随着时间增强, 然后谱线在红翼方向出现增强并逐渐远离. 然而色球谱线Mg II和过渡区谱线Si IV的运动情况稍有不同, 它们谱线强度和蓝移的最大值是不同步的. 这种Mg II和Si IV的谱线强度和蓝移速度的不对称性最早由Tian等人在IRIS谱线观测中发现, 并认为是激波的光谱表现形式[24]. 所有观测结果显示在太阳中高层大气看到的周期为3 min的黑子本影振荡很可能与太阳外层大气中竖直向上传播的MHD波有关, 它极可能是由向上传播的激波引起的[34].

致谢 感谢SDO/AIA和IRIS的开放数据政策. 感谢ADS数据库的协助. 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高.

参考文献

[1] Solanki S K. A&ARv, 2003, 11: 153
[2] Yuan D, Sych R, Reznikova V E, et al. A&A, 2014, 561: A19
[3] Feng S, Deng Z, Yuan D, et al. RAA, 2020, 20: 117
[4] Yuan D. RAA, 2015, 15: 1449
[5] Yang S, Zhang J, Jiang F, et al. ApJL, 2015, 804: L27
[6] Zhugzhda Y, Sych R. RAA, 2018, 18: 105
[7] Ji K, Jiang X, Feng S, et al. SoPh, 2016, 291: 357
[8] Sobotka M, Jurčák J. ApJ, 2009, 694: 1080
[9] Buehler D, Esteban Pozuelo S, de la Cruz Rodriguez J, et al. ApJ, 2009, 876: 47
[10] Tian H, Yurchyshyn V, Peter H, et al. ApJ, 2018, 854: 92
[11] Khomenko E, Collados M. LRSP, 2015, 12: 6
[12] Su J T, Ji K F, Cao W, et al. ApJ, 2016, 817: 117
[13] O'Shea E, Muglach K, Fleck B. A&A, 2002, 387: 642
[14] Feng S, Yu L, Yang Y F, et al. RAA, 2014, 14: 1001
[15] Nakariakov V M, Verwichte E, Berghmans D, et al. A&A, 2000, 362: 1151
[16] Shibasaki K. ApJ, 2001, 550: 1113
[17] Kobanov N I, Makarchik D V. A&A, 2004, 424: 671
[18] Priya T G, Wenda C, Su J T, et al. ApJ, 2018, 852: 15
[19] Tziotziou K, Tsiropoula G, Mein N, et al. A&A, 2006, 456: 689
[20] Li D, Yang X, Bai X Y, et al. A&A, 2020, 642: A231
[21] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. SoPh, 2012, 275: 17
[22] De Pontieu B, Title A M, Lemen J R, et al. SoPh, 2014, 289: 2733
[23] Li Y, Kelly M, Ding M D, et al. ApJ, 2017, 848: 118
[24] Tian H, DeLuca E, Reeves K K, et al. ApJ, 2014, 786: 137
[25] Scargle J D. ApJ, 1982, 263: 835
[26] Horne J H, Baliunas S L. ApJ, 1986, 302: 757
[27] Li D, Zhang Q M. MNRAS, 2017, 471: L6
[28] Yuan D, Su J T, Jiao F R, et al. ApJS, 2016, 224: 30
[29] Uitenbroek H. ApJ, 2000, 531: 571
[30] Bogdan T J. SoPh, 2000, 192: 373
[31] Ayres T R. New Eyes to See inside the Sun and Stars. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998: 403
[32] Simões P J A, Reid H A S, Milligan R O, et al. ApJ, 2019, 870: 114
[33] Su J T, Liu Y, Liu S, et al. ApJ, 2013, 762: 42
[34] Rouppe van der Voort L H M, Rutten R J, Sütterlin P, et al. A&A, 2003, 403: 277

Multi-wavelength Observations of Umbral Oscillations above a Sunspot

LI Dong
(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

Abstract We investigate the umbral oscillation at multi-height solar atmospheres above a sunspot in the active region National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 12680 on 2017 September 15. In this study, the extreme ultraviolet images were measured by the Atmospheric Imaging Assembly (AIA), while the ultraviolet spectral lines and images were observed by the Interface Region Imaging Spectrograph. At the sunspot umbra, the AIA 1700 Å intensity curve shows the primary oscillation with a long period of ~(4.2±0.8) minutes, while the intensity curves in AIA 1600 Å, 171 Å and 193 Å exhibit an apparent oscillation with a short period of ~(2.8±0.3) minutes. Meanwhile, a short period of ~(3.1±0.5)

minutes is found in the Mg II h & k lines and the slit-jaw image at 2796 Å, a short period of ∼(2.9±0.4) minutes is detected in the Si IV 1393.76 Å line. Our observations suggest that the oscillatory periods at the sunspot umbra decrease with the height of solar outer atmospheres. The short period is roughly equal to 3 minutes, which could be interpreted as the propagating slow magnetoacoustic wave above the sunspot umbra, and it might originate from the temperature minimum region and then propagate up to the corona. While the long period is close to 5 minutes oscillation in the photosphere, which might be regarded as the solar P-mode wave.

Key words sunspots, Sun: atmosphere, Sun: oscillations, magnetohydrodynamics (MHD), waves